
GUIMUS

- Desarrollo de una guía inteligente para museos basada en el reconocimiento de señales ultrasónicas con dispositivos móviles -

Informe Técnico

Grupo de Investigación en Sistemas Sensoriales (UEX)

Centro Nacional de Referencia de Aplicación de las
Tecnologías de la Información y la Comunicación (Cenatic)



Enero, 2017

Título

Desarrollo de una guía inteligente para museos basada en el reconocimiento de señales ultrasónicas con dispositivos móviles (GUIMUS)

Entidades

Grupo de Investigación en Sistemas Sensoriales (GISS)

Centro Nacional de Referencia de Aplicación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (Cenatic)

Participantes:

Fernando J. Álvarez Franco (GISS)

Teodoro Aguilera Benítez (GISS)

José A. Paredes Moreno (GISS)

José A. Moreno Zamora (GISS)

Manuel Domínguez Dorado (Cenatic)

Editorial:

Entidad Pública Empresarial *Red.es*. Plaza Manuel Gómez Moreno, s/n. Edificio Bronce, Madrid, 28020, Madrid

Edición:

Primera edición, 1 de Enero de 2017.

ISBN:

978-84-617-9504-8

Contacto:

Si desea ponerse en contacto con el autor principal de la obra, puede hacerlo electrónicamente en las siguiente dirección: fafranco@unex.es

Title:

Development of an intelligent guide for museums, based on the acknowledgement of ultrasonic signals, by means of mobile devices (GUIMUS)

Entities:

Sensory System Group (GISS)

National Center of Application of Information and Communication Technologies (Cenatic)

Authors:

Fernando J. Álvarez Franco (GISS)

Teodoro Aguilera Benítez (GISS)

José A. Paredes Moreno (GISS)

José A. Moreno Zamora (GISS)

Manuel Domínguez Dorado (Cenatic)

Editorial:

Entidad Pública Empresarial *Red.es*. Plaza Manuel Gómez Moreno, s/n. Edificio Bronce, Madrid, 28020, Madrid

Edition:

First Edition, January 1st 2017

ISBN:

978-84-617-9504-8

Contact:

In case you need to contact the main author of the work, it can be done electronically through the following e-mail: fafranco@unex.es

Hoja de firmas

Fernando J. Álvarez Franco

< Investigador principal >

Teodoro Aguilera Benítez

< Investigador GISS >

José A. Paredes Moreno

< Investigador GISS >

José A. Moreno Zamora

< Investigador GISS >

Manuel Domínguez Dorado

< Investigador CENATIC >

Índice

Resumen	3
Abstract	5
1 Antecedentes	7
1.1 Interés socio-económico y científico	8
1.2 Fases en el diseño del sistema	9
2 Introducción	11
3 Descripción del sistema	13
3.1 Arquitectura global	13
3.2 <i>Tags</i> acústicos	14
3.3 Receptor portátil	15
4 Caracterización del sistema	17
4.1 Robustez frente al ruido	19
4.2 Cobertura	19
4.3 Resistencia a desplazamientos Doppler	21
5 Implementación y resultados experimentales	25
6 Aspectos legales y continuidad del producto	31
6.1 Requisitos no técnicos en GUIMUS	32

6.2	Licencia para GUIMUS	32
6.3	Selección de componentes	33
7	Conclusión	35
	Bibliografía	39

Resumen

Este proyecto técnico presenta un sistema de posicionamiento local basado en la identificación de celda a través de señales acústicas de alta frecuencia, y por medio de un dispositivo portátil. Para ello, se asignan distintos códigos binarios a diferentes posiciones denominados *tags* acústicos. Las señales que se emiten están moduladas en BFSK, es decir, a cada bit le corresponde una frecuencia de portadora distinta. Además, cada código se precede de una señal tipo *chirp*, con el fin de sincronizar el mensaje, y permitir una detección no-coherente incluso bajo condiciones desfavorables de desplazamiento Doppler.

Primero, se realiza una caracterización del sistema de posicionamiento respecto a la robustez frente al ruido, cobertura y desplazamientos Doppler, a través de un simulador modular, basado en tres etapas que tienen en cuenta la respuesta en frecuencias del par emisor-receptor, la atenuación de las señales acústicas en el aire y la demodulación no-coherente. A continuación, se implementa el sistema en un dispositivo portátil basado en la plataforma *Android* y se realizan pruebas experimentales en un escenario real. Los resultados obtenidos muestran similitud con los simulados en la caracterización previa, con lo que se confirma la viabilidad para desarrollar el sistema propuesto.

Abstract

This technical report presents a cell identification based positioning system based on the detection of high frequency acoustic signals by means of a portable device. A Binary Frequency Shift Keying modulated code is used to tag the different locations. This code is preceded by a synchronizing chirp waveform that allows non-coherent detection even under strong Doppler frequency shifts.

The positioning system is first characterized in terms of robustness against noise, coverage and Doppler resilience making use of a modular simulator. This simulator is based on three basic stages that account for the frequency response of the emitter- receiver pair, the attenuation of acoustic signals in air, and the non-coherent demodulation. This system is then implemented in an Android-based platform and tested in a real scenario. The results of this experimental analysis show good agreement with the previous characterization, and they also confirm the feasibility of the proposed system to develop location-aware applications.

Capítulo 1

Antecedentes

El proyecto que se detalla en esta memoria técnica está encuadrado dentro de los proyectos de promoción general de conocimiento y de I+D orientada, promovidos por la Consejería de Empleo, Empresa e Innovación del Gobierno de Extremadura, financiados por los fondos FEDER de la Unión Europea.

El objetivo principal que se persigue es el desarrollo de una guía inteligente para museos, que sustituya a las tradicionales audio-guías. Esta guía inteligente se basa en el uso del propio teléfono móvil o tablet del visitante como plataforma, sobre la que el usuario se descargará una aplicación gratuita que le irá proporcionando información multimedia de las obras expuestas en función de su ubicación en el interior del museo. Para ello, se pretende llevar a cabo la emisión de señales acústicas de alta frecuencia y baja potencia, que serán detectadas por el propio micrófono del dispositivo móvil del usuario. Todo el procesamiento de las señales detectadas lo realizará el microprocesador de este dispositivo, sin necesidad por tanto de ningún tipo de hardware adicional.

La tecnología acústica que se propone en el proyecto GUIMUS representa una importante novedad frente a otras tecnologías que ya están comenzando a utilizarse en el desarrollo de este tipo de Servicios Basados en la Localización, e introduce importantes mejoras en su funcionalidad. Así por ejemplo, se libera al usuario de

la necesidad de participar en el proceso de captura de hitos de señalización como los códigos QR y es además computacionalmente mucho menos costosa que las tecnologías basadas en el procesamiento de imágenes.

Las guías inteligentes que son objeto de desarrollo en este proyecto no sólo proporcionarán información multimedia en función de la ubicación del visitante, sino que también se pretende establecer en un futuro un flujo de información en sentido contrario para que el museo pueda conocer a través de ellas pautas de comportamiento de estos visitantes, como por ejemplo el tiempo que una determinada obra expuesta es observada o el trayecto seguido a través de las salas del museo. Esta información, que a día de hoy solo puede extraerse de forma manual mediante encuestas o el análisis de las grabaciones de las cámaras de video, podrá recopilarse de forma automatizada a través de las nuevas guías inteligentes, proporcionando así al museo una valiosa herramienta para mejorar la organización de sus exposiciones.

1.1 Interés socio-económico y científico

Según los datos arrojados por el Instituto de Estudios Turísticos, España tiene una cuota mundial en el turismo de “sol y playa” del 32 % mientras que tan solo representa una cuota mundial en el turismo cultural del 8 %. En uno de los países con mayor patrimonio y recursos culturales del mundo estos datos tienen, cuando menos, que igualarse. Para ello se debe dejar atrás la concepción tradicional del espacio cultural como lugar de recepción y conservación para dar paso a un nuevo concepto en el que el complejo cultural busque una experiencia más enriquecedora y entretenida para el visitante. Qué mejor forma de mejorar la actual oferta turística que introduciendo las nuevas tecnologías en el sector del turismo tomando como base un sistema robusto y preciso de localización en espacios donde los sistemas satelitales no ofrecen solución. De esta forma, una vez se tiene garantizada la monitorización de la posición del visitante, se pueden ofrecer numerosas aplicaciones

que mejoren la oferta actual, entregando al visitante un servicio a la carta.

Se puede por lo tanto hablar de una revolución de una gran mayoría de empresas del sector turismo que actualmente ofrecen un servicio al visitante unidireccional y en cierto modo arcaico.

1.2 Fases en el diseño del sistema

El desarrollo de este proyecto se ha estructurado en cuatro fases bien definidas, con un periodo total de ejecución de 24 meses. Se enumeran a continuación estas fases y las principales tareas a desarrollar en cada una de ellas.

- FASE 1: DISEÑO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL ULTRASÓNICO
 1. Estudio y definición de la arquitectura LPS más adecuada.
 2. Diseño de las balizas.
 3. Estudio de la cobertura y calibración.
- FASE 2: DESARROLLO DE LAS APLICACIONES SOFTWARE DE GUÍA INTELIGENTE
 4. Estudio de las especificaciones hardware de los dispositivos móviles.
 5. Definición, configuración y aprendizaje de las herramientas software de programación.
 6. Programación de los dispositivos.
 7. Pruebas en laboratorio y licenciamiento del software libre.
- FASE 3: DISEÑO DEL SISTEMA SERVIDOR CENTRAL
 8. Definición de las características funcionales del sistema.
 9. Definición de las características técnicas del sistema.
 10. Diseño de un prototipo y pruebas experimentales.

- FASE 4: PRUEBAS DE CAMPO Y ELABORACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN

11. Pruebas de campo.

12. Elaboración de la documentación final.

En la figura 1.1 puede encontrarse un cronograma detallado con las tareas anteriormente expuestas.

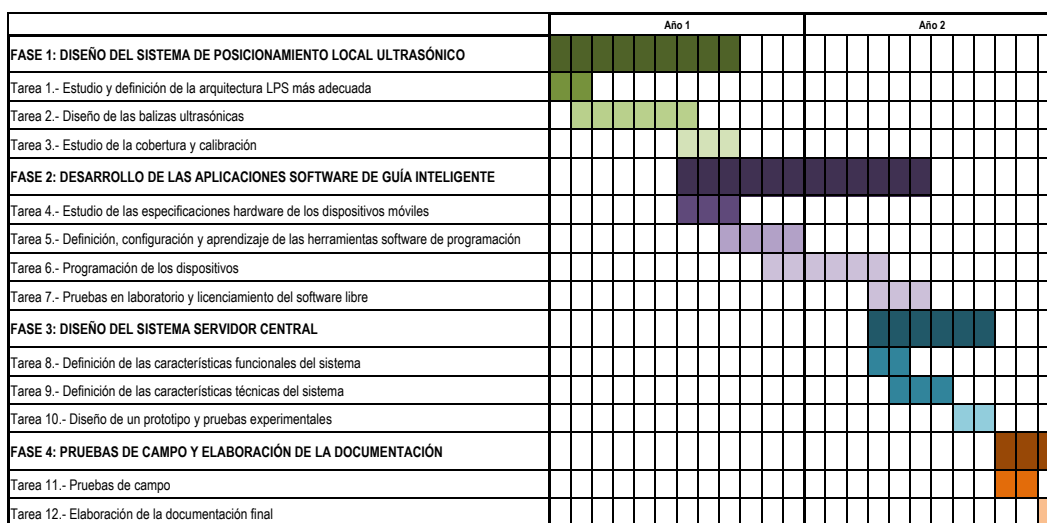


Figura 1.1: Cronograma de tareas del proyecto.

Capítulo 2

Introducción

La tecnología acústica se ha usado desde siempre en el diseño de sistemas de posicionamiento en interiores, y hoy en día está considerada como una solución clásica en estos sistemas [27, 25]. Los primeros sistemas de posicionamiento local de propósito general (ALPS) surgieron a principios de siglo [1, 33, 10, 30], y se basaban en técnicas de detección de envolvente para estimar el tiempo de llegada (ToA) de emisiones ultrasónicas de banda estrecha. Poco después fue incorporada la codificación de espectro expandido, con el fin de mejorar la precisión en la localización y la robustez contra el ruido. Para ello, se valían de la detección de señales de banda ancha a través de filtros acoplados [13, 12, 29, 36]. Desde entonces, los ALPS han ido avanzando tanto en *hardware* como en técnicas de procesamiento de señal, como compensación a los desplazamientos Doppler [3, 41], cancelación de interferencias [37] o erradicación del multicamino [43, 2].

Hoy en día, existe un renovado interés por el diseño de ALPS para la localización a través de dispositivos portátiles, por ejemplo, *Beep* [26] y su posterior evolución [24], que usan un asistente digital personal (PDA) para emitir pulsos ultrasónicos y detectarlos con una matriz de micrófonos, conectados por WLAN con una CPU. Estos sistemas alcanzan precisiones por debajo de 70 cm en el 90 % de los casos, y de 40 cm si los objetivos están relativamente alejados de paredes y

esquinas. Otro trabajo similar se presenta en [9], donde se usa un *smartphone* para emitir pulsos ultrasónicos cortos de 21.5 kHz y detectarlos en una matriz de cuatro micrófonos. Los errores observados están por debajo de 10 cm. En [28] se propone una solución distinta: el sistema *BeepBeep* de localización, donde los autores presentan una técnica *two-way sensing* para estimar la distancia relativa entre una PDA y un *smartphone*. Midiendo el tiempo de vuelo entre dos señales de tipo chirp con frecuencias entre 2 y 6 kHz, logran errores de 5 cm para distancias inferiores a 4 m. Más tarde, algunos trabajos se beneficiaron de esta técnica para desarrollar sistemas de posición relativa en interiores entre *smartphones* y *tablets* [42, 31, 32], con errores entre 10 y 30 cm. Estas precisiones del orden del centímetro son una de las características más importantes de los ALPS frente a otro tipo de tecnología. También, la baja velocidad del sonido en el aire implica que la longitud de onda sea corta, lo que beneficia la resolución espacial de los sistemas acústicos.

Por el contrario, una de las principales desventajas que tradicionalmente se atribuyen a los ALPS, es su cobertura limitada, debido a su estrecho haz de emisión y su corto rango de propagación para altas frecuencias de señales acústicas. Sin embargo, esta, en principio, característica desfavorable, será utilizada para construir un sistema de identificación de celda en distancias cortas, de gran interés para algunas aplicaciones que no requieren localización precisa.

En este contexto se sitúa el presente proyecto, que desarrolla una aplicación consistente en una guía inteligente para un museo. Se hace uso de un dispositivo portátil (móvil o tablet) para la detección incoherente de señales acústicas moduladas en alta frecuencia (FSK). Se han llevado a cabo trabajos similares usando tecnología *Bluetooth* de baja energía [18] (BLE); sin embargo, requiere del usuario un comportamiento activo y presenta altos tiempos de latencia [7], que no existen en el sistema acústico presentado.

Capítulo 3

Descripción del sistema

3.1 Arquitectura global

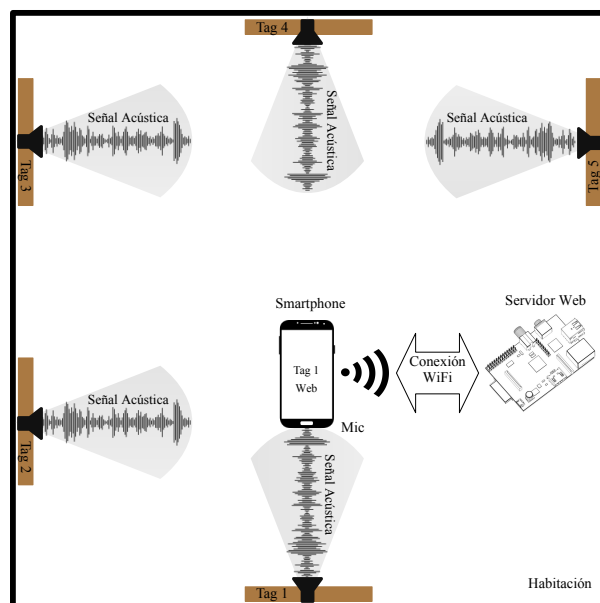


Figura 3.1: Arquitectura global del sistema.

La arquitectura global del ALPS propuesto aparece en la figura 3.1. Se dispone un grupo de *tags* en una habitación o en un edificio, y cada una de ellas cubre una determinada y reducida área en frente de ellas. Cuando el receptor, un dispositivo

portátil, se encuentre cerca de una de ellas y con su micrófono apuntando hacia el *tag*, éste recibe una emisión codificada que identifica dicha etiqueta sin ambigüedad. El código se envía a través de la conexión WiFi a un servidor local, basado en una plataforma *Raspberry Pi 3B* [34], que provee de información contextual al dispositivo portátil. Esta información podría, por ejemplo, aportar la localización y alguna instrucción de navegación, de modo que el comportamiento sería el de un sistema de posicionamiento basado en la identificación de celda, donde a cada usuario se le asigna la localización de la baliza de la que está recibiendo la señal [40]. Ni que decir tiene que esta información podría ser más completa, añadiendo, por ejemplo, una descripción multimedia de ciertas obras de una sala de un museo [4].

3.2 Tags acústicos

Para etiquetar cada localización, se han usado transductores de alta frecuencia del tipo KSSG1708 [17], que presentan un respuesta en frecuencia máxima a 20 kHz, con un nivel de presión sonora de 87 dB a 10 cm (figura 3.2).

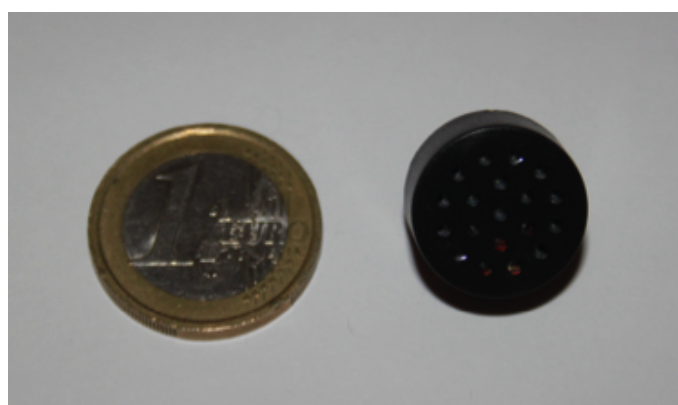


Figura 3.2: Foto del transductor *Kingsgate* del tipo KSSG1708.

La emisión completa se lleva a cabo con este transductor, junto con un amplificador de audio de clase-D y un microcontrolador STM32L476VG [39] de bajo coste, que almacena un código modulado en BFSK y que únicamente lo identifica

a él. La longitud del código es de N -bits, donde N es el primer número entero por encima de $\log_2 M$, y M es el número de localizaciones a etiquetar. Las frecuencias usadas para modular las señales son $f_0 = 17$ kHz y $f_1 = 19$ kHz para los bits 0 y 1 respectivamente, con quince ciclos de portadora por ciclo de modulación, lo que lleva a una duración media del mensaje de T_m :

$$T_m = \frac{15N}{2} \left(\frac{1}{f_0} + \frac{1}{f_1} \right) \simeq N \, 836 \, \mu s \quad (3.1)$$

Cada mensaje es precedido de una cabecera compuesta por una señal tipo *chirp*, con el objeto de encontrar el inicio del mensaje a través de un filtro acoplado. El *chirp* barre frecuencias desde 16 kHz hasta 20 kHz en un periodo de 4 ms, consiguiendo así un producto tiempo-ancho de banda de 16, lo que asegura buenas propiedades de autocorrelación para este propósito. Se ha escogido esta forma de onda debido a la similitud de su función de autocorrelación con las funciones tipo delta (como otras secuencias pseudo-aleatorias) y por su mejor tolerancia a desplazamientos Doppler [20].

3.3 Receptor portátil

Como se ha dicho anteriormente, el ALPS propuesto usa como receptor un dispositivo portátil, que demodula la señal descrita en el apartado 3.2 tal y como se muestra en el esquema de la figura 3.3. Como se observa en esta figura, primero, se digitaliza la señal con una frecuencia de muestreo de recepción de 96 kHz, y justo después, se le aplica un filtro acoplado, con el fin de sincronizar el principio del mensaje binario, gracias al pico de correlación del *chirp*. El mensaje pasa luego a través de dos filtros FIR paso-banda, centrados en las frecuencias de las portadoras y con 2 kHz de ancho de banda. Se calcula la envolvente de cada salida de los filtros, y se llega a la última etapa de decisión, que provee el código binario identificativo.

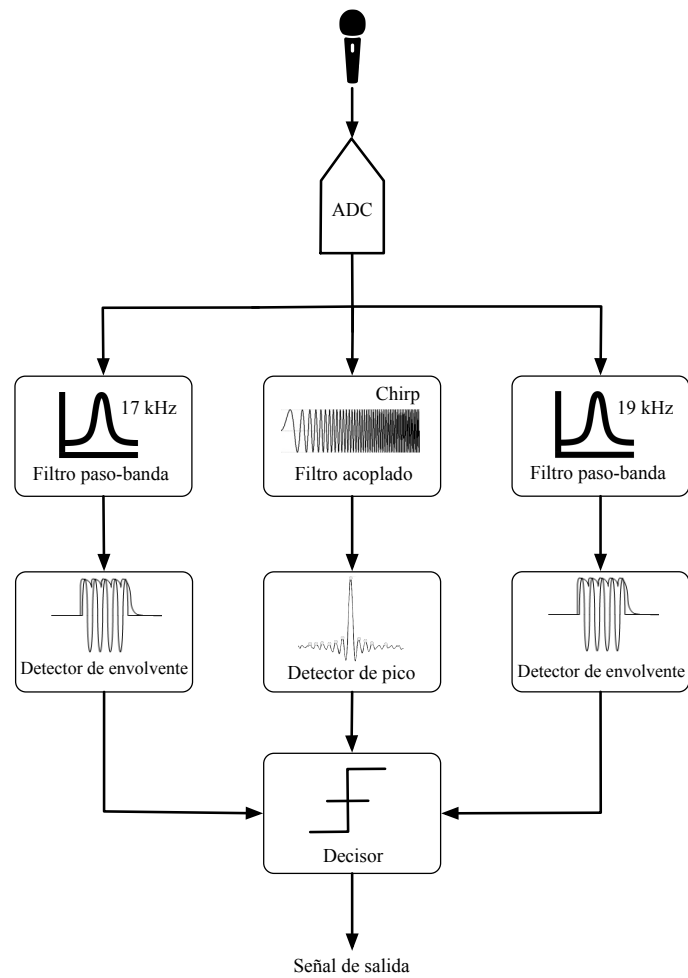


Figura 3.3: Diagrama de bloques del receptor propuesto (detector FSK no-coherente).

Capítulo 4

Caracterización del sistema

Después de la visión global aportada en el capítulo 3, en este se tratará de caracterizar el ALPS en términos de su robustez contra el ruido, cobertura y resistencia a desplazamientos Doppler. Para ello, se hará uso de un simulador modular, con tres niveles básicos: el primero, modela la respuesta en frecuencias del par emisor-receptor (obtenida experimentalmente, con el dispositivo colocado a 1 m del transductor ultrasónico y en su eje acústico). La figura 4.1 muestra las respuestas tanto experimental (rombos rojos), como el modelo que simula su comportamiento a través de un filtro FIR (línea sólida azul). También se indica el rango de trabajo: de 16 kHz a 20 kHz, que se ha escogido persiguiendo tres metas:

1. Trabajar en una zona de baja perceptibilidad para el oído humano.
2. Generar emisiones cortas
3. Restringir la cobertura tanto longitudinal como angular del *tag* acústico.

El segundo nivel del simulador toma en cuenta la atenuación de las ondas acústicas en el aire, considerando la absorción atmosférica predicha por la norma ISO 9613-1 [14], así como la dispersión geométrica. Por tanto, la presión acústica a

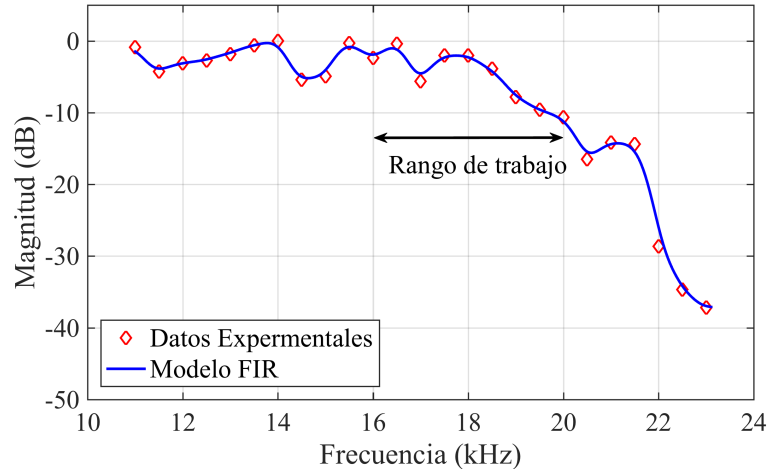


Figura 4.1: Respuesta en frecuencias del par emisor-receptor.

una distancia de r metros desde el emisor, vendrá dada por:

$$P(r)(\text{dB}) = P_0 - 20 \log r - 8,68 \alpha(f)(r - r_0) \quad (4.1)$$

donde P_0 es la presión acústica a la distancia de referencia ($r = 1$ m), y $\alpha(f)$ es el coeficiente de absorción atmosférica dependiente de la frecuencia, dado por la norma ISO, y puede ser evaluado a través de la siguiente expresión:

$$\alpha = f^2 \left(18,4 \cdot 10^{-12} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1/2} + \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{-5/2} \left[0,01275 \frac{e^{-2239,1/T}}{f_{rO} + f^2/f_{rO}} + 0,1068 \frac{e^{3352/T}}{f_{rN} + f^2/f_{rN}} \right] \right) \quad (4.2)$$

donde f es la frecuencia de la onda en Hz; P representa la presión atmosférica en kPa ($P_{ref} = 101,325$ kPa); T es la temperatura absoluta ($T_{ref} = 293,15$ K); y f_{rO} , f_{rN} representan las frecuencias de relajación del oxígeno y del nitrógeno respectivamente.

Finalmente, el último nivel del modelo simula el comportamiento del detector FSK no-coherente, descrito en la sección 3.3, asumiendo la transmisión de códigos

de 8 bits.

4.1 Robustez frente al ruido

Para el análisis del ALPS en condiciones ruidosas, se toman diferentes niveles de SNR, desde 0 dB hasta 15 dB en incrementos de 3 dB (considerados a la distancia de referencia $r_0 = 1$ m). Para cada nivel de SNR, se simula un total de 25600 (100 emisiones \times 256 códigos), a diferentes distancias, desde 1 m hasta 4 m, en incrementos de 10 cm. En la figura 4.2 puede verse el porcentaje total de mensajes acertados; obviamente, la presencia de ruido tiene importantes efectos en el rendimiento del sistema. Para SNR por debajo de 6 dB, se observan porcentajes de acierto menores al 90 % a 1 m de distancia; sin embargo, con un SNR de 15 dB, el acierto sube al 100 % a 1 m, y por encima del 60 % hasta 4 m.

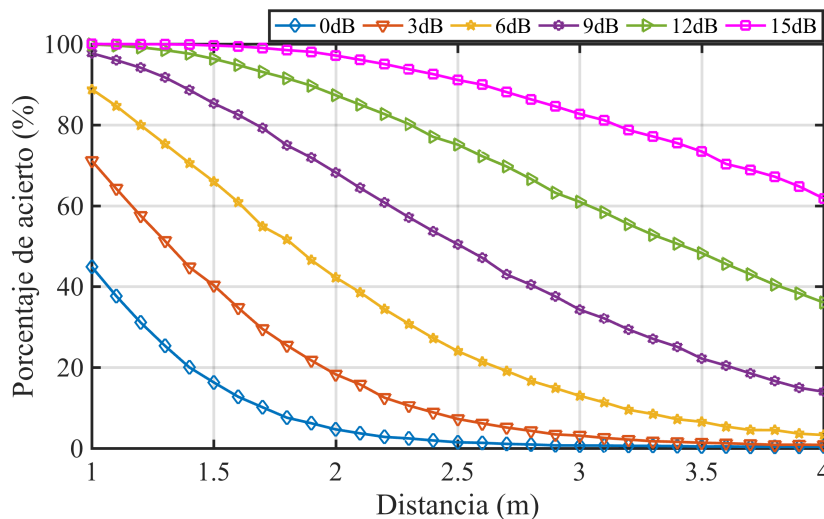


Figura 4.2: Porcentaje de acierto en la detección del mensaje con diferentes niveles de SNR.

4.2 Cobertura

En esta sección se simula la cobertura a través del modelado del patrón de emisión del transductor, que, para uno con forma de pistón, como el Kingstate KSSG1708,

puede expresarse como:

$$D(\varphi, \theta) = D(\theta) = \frac{2J_1(k \cdot a \sin \theta)}{k \cdot a \sin \theta} \quad (4.3)$$

donde a es el radio del pistón, $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda, θ es el ángulo con respecto al eje acústico, y J_1 es la función de Bessel de primer orden. En la figura 4.3 se muestra este comportamiento, para el transductor usado ($a = 8,5$ mm) y las dos frecuencias de portadora $f_0 = 17$ kHz y $f_1 = 19$ kHz. Cabe destacar que, para

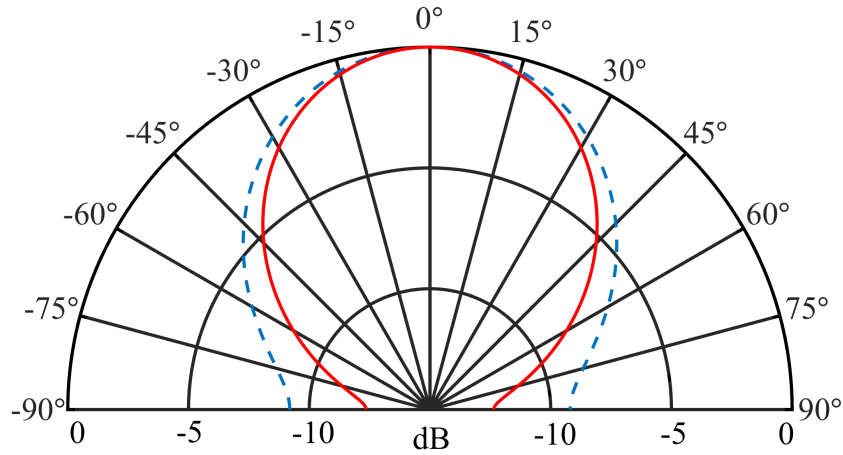


Figura 4.3: Patrón de directividad para transductores de tipo pistón a 17 kHz (línea punteada) y 19 kHz (línea sólida).

un ángulo fijo θ , la ecuación 4.3 da la respuesta del transductor como función del número de onda, o equivalentemente, representa la respuesta en frecuencia en una dirección dada. Es sencillo ver que, para $\theta \neq 0$ (fuera del eje acústico), D es función de k y el transductor se comporta como un filtro sobre la señal emitida.

En este estudio, se han definido 91 posiciones de test alrededor del transductor, a distancias desde 1 m a 4 m en incrementos de 0.5 m, y con ángulos de incidencia desde -90° hasta 90° en incrementos de 15° . Y, para cada una de ellas, se han repetido las 25600 emisiones, asumiendo una SNR de 12 dB a 1 m sobre el eje acústico. En la figura 4.4 está representado el porcentaje de acierto de detección del mensaje a distintas distancias y ángulos de incidencia, donde puede apreciarse el efecto de filtrado predicho en la ecuación 4.3.

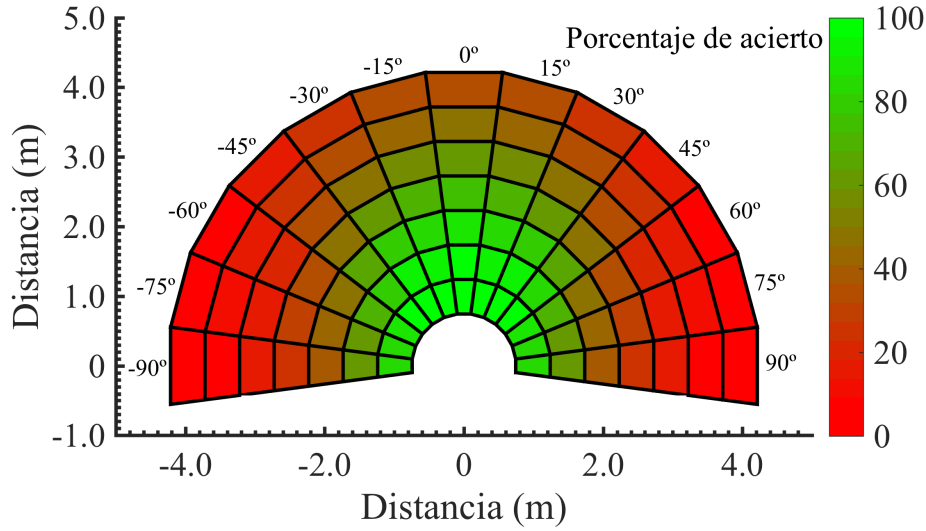


Figura 4.4: Porcentaje de acierto en la detección del mensaje respecto a la distancia y al ángulo de incidencia.

4.3 Resistencia a desplazamientos Doppler

Una de las características más importantes del ALPS propuesto es la resistencia a los desplazamientos provocados por el efecto Doppler, heredada del *chirp* y la detección no-coherente. Se puede simular este fenómeno asumiendo una frecuencia virtual de muestreo en el receptor dada por:

$$f'_s = f_s \left(1 + \frac{v_r}{c} \right) \quad (4.4)$$

donde f_s es la frecuencia de muestreo real (96 kHz), v_r es la velocidad radial del receptor con respecto al emisor (positiva si se aproxima), y c es la velocidad del sonido en el aire. La señal adquirida se obtiene por interpolación cúbica de estas muestras virtuales.

Para este estudio, las velocidades se han tomado desde 0 hasta 4 m/s, tomando la distancia del receptor como $r_0 = 1$ m, con una SNR de 12 dB. La figura 4.5 muestra el porcentaje de acierto en la detección del mensaje respecto a la velocidad

radial del receptor. Como puede verse, hasta 2.8 m/s se alcanzan porcentajes por encima del 90 %. En el sistema real, muy raramente se alcanzarán velocidades mayores. Cabe destacar que este límite superior es mucho más bajo que el impuesto por el filtrado de las portadoras desplazadas, que viene dado por

$$v_{r,max} \simeq \frac{BW \cdot c}{2 f_c} \quad (4.5)$$

donde f_c es la frecuencia de la portadora y BW es el ancho de banda de los filtros

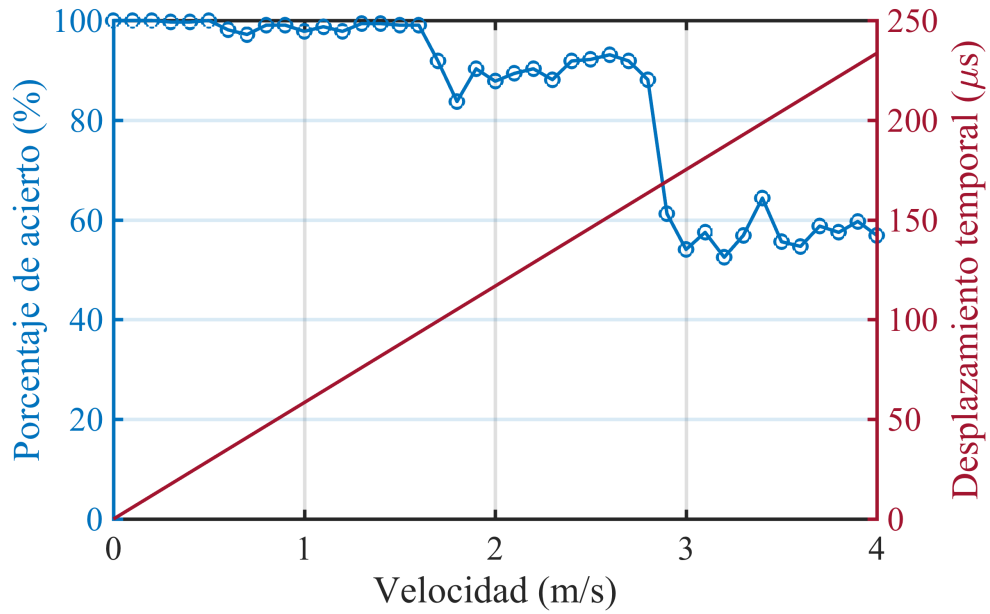


Figura 4.5: Porcentaje de aciertos en la detección del mensaje (línea punteada roja) y desplazamiento del pico de autocorrelación (línea sólida roja) frente a la velocidad del receptor.

paso banda del receptor. Para $BW = 2$ kHz, el límite es de $v_{r,max} \simeq 18$ m/s. La resistencia a estos desplazamientos en este sistema viene dada realmente por el desplazamiento temporal del pico de autocorrelación usado para sincronizar el principio del mensaje:

$$\tau_{desp} = \Delta f \frac{T}{B} \quad (4.6)$$

con $\Delta f = f v_r / c$, desplazamiento de la frecuencia central, T la duración del *chirp* en segundos, y B su expansión en frecuencia. En este caso, $\tau_{desp}(\mu s) = 58,3 v_r$.

Precisamente, este tiempo de desplazamiento también aparece representado en la figura 4.5, junto con la tasa de acierto. Puede verse cómo existe un decrecimiento importante de dicha tasa en $v_r = 2,9$ m/s, cuando el tiempo de desplazamiento alcanza, aproximadamente, el 20 % de la duración del bit ($169 \mu\text{s}$).

Capítulo 5

Implementación y resultados experimentales

La implementación práctica descrita en la sección 3.3 se ha llevado a cabo en un teléfono móvil *LG X Screen (LGK500N)* [21]), equipado con 2 GB de memoria RAM y un procesador *Quad-Core Qualcomm Snapdragon 410 MSM8916v2* a 1.4 GHz. Incorpora el sistema operativo *Android 6.0 Marshmallow*, que permite la adquisición a 96 kHz.

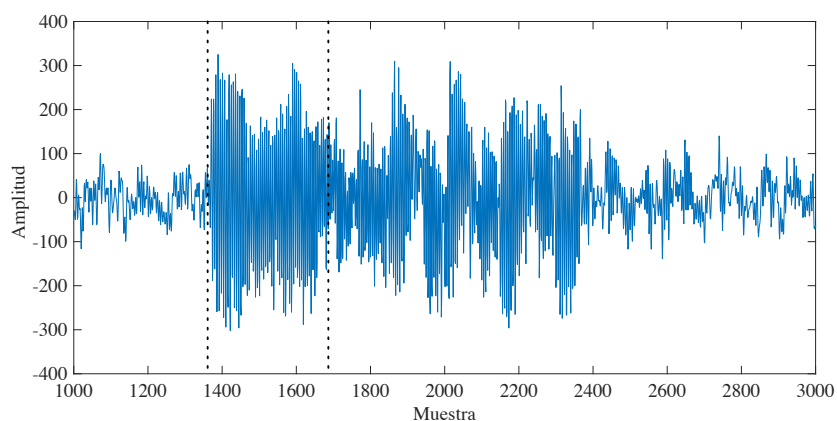
El procesamiento de señal se lleva a cabo de modo *off-line*, es decir, primero se adquiere un número de muestras suficientemente alto para asegurar la presencia de, al menos, dos emisiones consecutivas (emisión+espera+emisión), y posteriormente se realizan las operaciones con el propio móvil. El tamaño de la adquisición garantiza que al menos se tiene un mensaje completo sin cortes. Después, se procesa ese mensaje en el dominio de la frecuencia, haciendo uso de la transformada rápida de Fourier (FFT), aportada por las librerías *JTransforms* [15], y caracterizadas por su buen rendimiento en tareas de correlaciones. La programación se ha realizado a través de *Android Studio SDK* [5].

En la figura 5.1a puede encontrarse un ejemplo de una señal real adquirida por el *smartphone* situado a 1 m del emisor. El mensaje emitido fue el {10101010}.

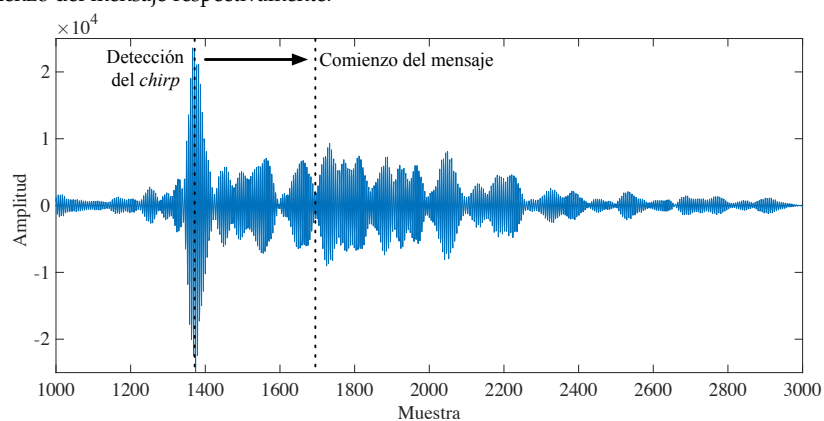
La 5.1b muestra esta señal después de su correlación con el *chirp*. Y, por último, la figura 5.1c representa las salidas de los filtros centrados en 17 kHz y 19 kHz. Como se ha explicado, se muestrean sus envolventes a 96 kHz para alimentar la siguiente etapa: el decisor, que determina el bit transmitido.

Como en sección 4.2, se ha analizado la cobertura del *tag* acústico. Para ello, se han usado las mismas 91 posiciones, en las que se han capturado cientos de emisiones del código comentado anteriormente con el *smartphone* en cada una de ellas. La tasa de acierto aparece representada en la figura 5.2. Durante estas pruebas, se midió un SNR real de 12 dB a la distancia de referencia de 1 m. Como puede comprobarse, los resultados están en concordancia con los simulados representados en la figura 4.4, aunque existen algunas diferencias. La cobertura del emisor real parece que es mayor que la simulada, y, además, presenta ciertas discontinuidades, que no se observan en dicha gráfica. Esto puede deberse a la presencia de multicamino en el sistema real, como consecuencia de las reflexiones del suelo, que no se han tenido en cuenta en la simulación, y su efecto podría ser menos severo de lo considerado.

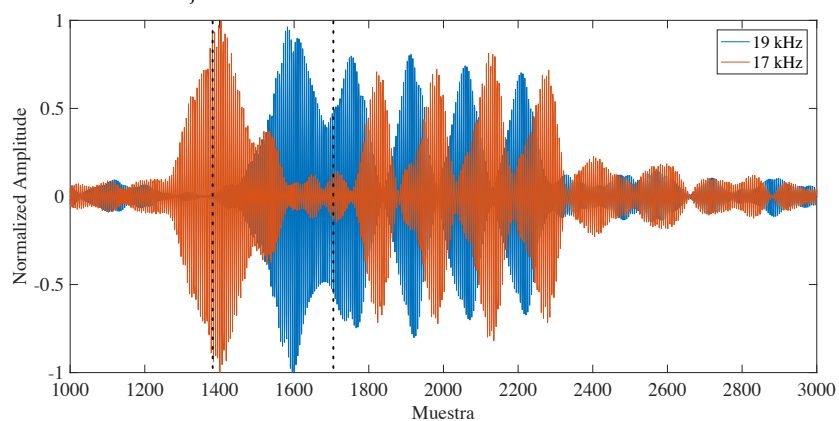
Por último, se ha realizado un análisis del consumo de batería de la aplicación desarrollada. En la figura 5.3 aparecen dos curvas representando el tiempo que tarda en descargarse la batería: una de ellas (azul) tomada mientras se ejecuta el *software* mínimo para que funcione el sistema operativo, mientras que la otra (roja) se corresponde con los tiempos de descarga mientras funciona también la aplicación. Puede verse cómo la aplicación reduce la batería al 40 % después de un periodo de 7 horas. Hay que tener en cuenta que, para un uso típico, la aplicación estará ejecutándose durante un corto periodo de tiempo, y no de manera continua, reduciendo aún más el consumo de batería.



(a) Señal real adquirida por el *smartphone*. Las líneas punteadas marcan el *chirp* y el comienzo del mensaje respectivamente.



(b) Salida del filtro acoplado; se señala el pico de autocorrelación del *chirp* así como el comienzo del mensaje.



(c) Salidas de los filtros paso-banda centrados en 17 kHz (roja) y 19 kHz (azul), correspondientes a los bits 0 y 1 respectivamente.

Figura 5.1: Ejemplo de una señal real adquirida y su posterior procesamiento.

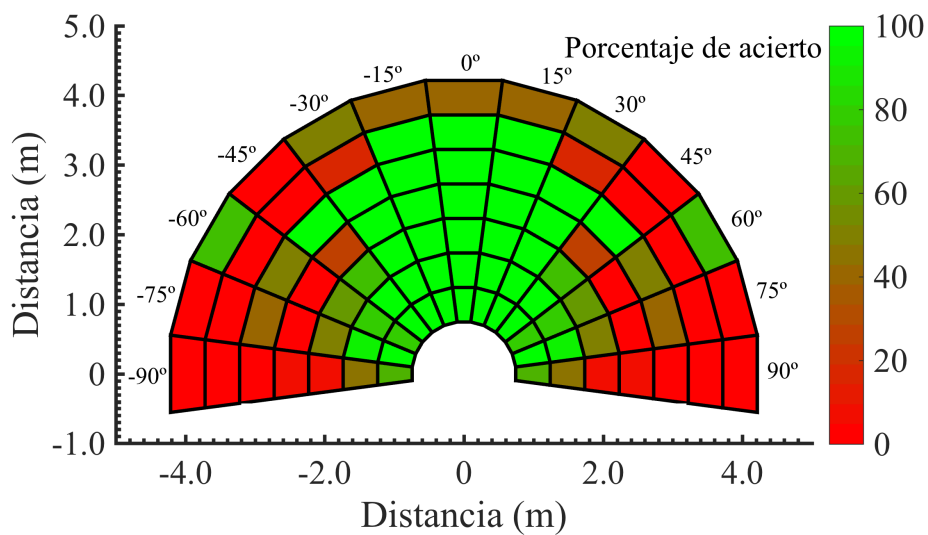


Figura 5.2: Porcentaje de acierto experimental en la detección del mensaje respecto a la distancia y al ángulo de incidencia.

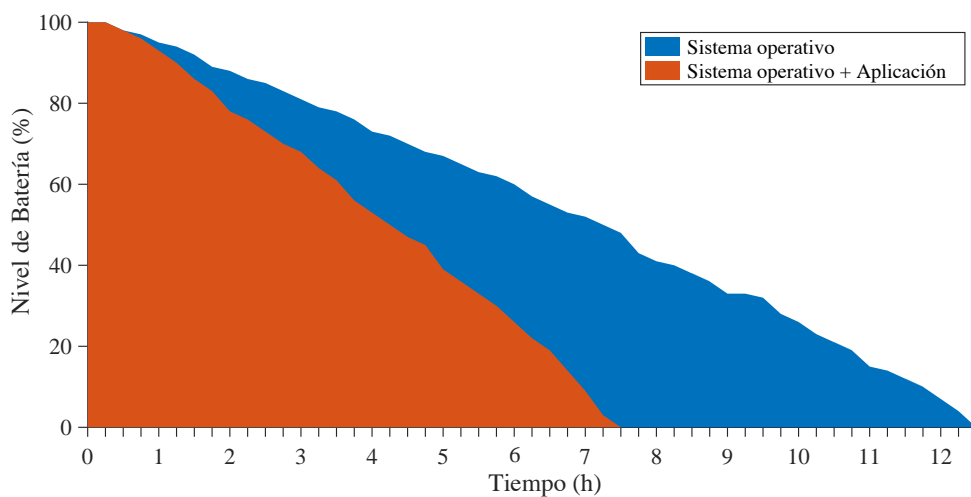
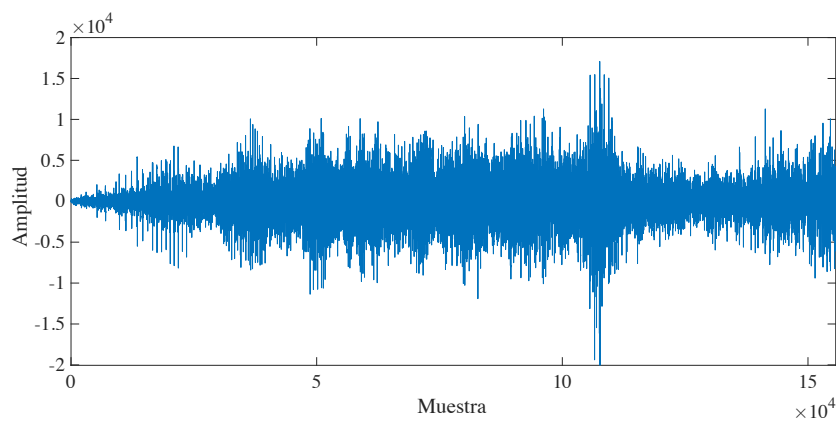
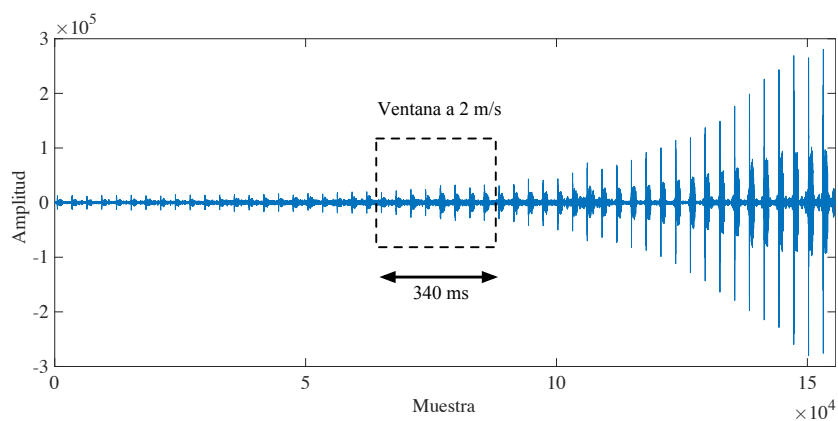


Figura 5.3: Consumo de batería.



(a) Señal real adquirida.



(b) Señal real después de su correlación con el *chirp*.

Figura 5.4: Ejemplo de una señal real adquirida durante las pruebas de desplazamiento Doppler.

Capítulo 6

Aspectos legales y continuidad del producto

El proyecto GUIMUS ha tenido siempre presente la necesidad de hacer que el software resultante del proyecto fuese software libre. Para ello, la participación de CENATIC ha tenido una importancia destacada. Existen consideraciones legales a la hora de utilizar, distribuir o incorporar software libre a un proyecto [35] y a día de hoy sigue existiendo bastante confusión en los siguientes aspectos:

- Qué componentes opensource pueden ser combinados en un mismo proyecto.
- Qué licencia global puede darse al proyecto teniendo en cuenta el conjunto de componentes utilizados (y sus licencias respectivas).
- Qué modelo de evolución del proyecto, o que modelo de negocio, elegir. Y cuál es la licencia global más apropiada que permita potenciar dicho modelo.

Estos tres aspectos están íntimamente relacionados y afectan al proyecto en todo su ciclo de vida: el modelo está influenciado por la licencia global elegida que, a su vez, se encuentra afectada de forma directa por los componentes que forman el producto final.

6.1 Requisitos no técnicos en GUIMUS

Desde la propia propuesta del proyecto, se hizo hincapié en el deseo de crear un modelo de negocio [6] alrededor de los resultados del proyecto si se daban las condiciones para ello. El modelo de negocio no sólo hace referencia a los aspectos pecuniarios, sino a la evolución de los resultados obtenidos más allá de los límites temporales del proyecto. Y en este sentido, los aspectos legales juegan un papel muy importante.

Se diseñó el proyecto teniendo en cuenta las siguientes premisas no técnicas relacionadas con la licencia global del proyecto:

- Debía facilitarse la evolución del proyecto, posibilitando la incorporación de técnicas novedosas que pudiesen surgir en cualquier lugar [11].
- Debía poderse incluir el proyecto dentro de un proyecto mayor con las menores fricciones posibles, entendiendo el proyecto GUIMUS como un facilitador para la participación en proyectos de mayor envergadura o para su aplicación en nuevos casos de uso [8, 38, 19, 22].
- Se debían aportar las condiciones necesarias para que, llegado el caso, el proyecto pudiese ser explotado desde un punto de vista comercial, como producto asilado o integrado con otros productos libres o no [23, 16].

6.2 Licencia para GUIMUS

El conjunto de requisitos expresados en el apartado anterior sugería la utilización de una licencia de tipo “permisiva”. Esto es, que no imponga demasiadas restricciones a la explotación comercial o la integración con productos comerciales.

Las licencias restrictivas tipo GPL (General Public License) imponen un modelo de licenciamiento viral en el que todos los trabajos subsecuentes sobre el proyecto así como el resultado de la combinación con otros productos deben ser forzosamente redistribuidos con la misma licencia. Esto, que en principio busca la reciprocidad

en el desarrollo (si te aprovechas de algo GPL, estás obligado a liberar tu código como GPL para que otros se puedan aprovechar también) complica otros aspectos; por ejemplo la integración con otros componentes *opensource* con sus propias licencias o la adopción de este tipo de *opensource* en un contexto comercial.

Por su parte, las licencias permisivas dan la posibilidad de que, a discreción del desarrollador, se pueda continuar con la misma familia de licencias. Pero no fuerzan, llegando incluso a permitir la utilización de componentes liberados con estas licencias en software privativo no *opensource*. Estas licencias facilitan la coexistencia de un conjunto de componentes heterogéneos (en cuanto a su licenciamiento) y, cada vez más, tienen buena aceptación en el ecosistema del software libre.

Licencias permisivas son por ejemplo la MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), la BSD-2 (*Berkeley Software Distribution 2-clauses*) o la licencia *Apache v2*. Esta última, de la que es garante la *Apache Foundation*, se ha convertido en un estándar de facto en productos y componentes *opensource* desarrollados en Java debido a que casi todos los componentes que se pueden necesitar en un desarrollo en Java se pueden encontrar con esta licencia. Y esto facilita bastante la integración de componentes.

Por tanto, dado que una licencia como la *Apache v2* satisface razonablemente bien los requisitos no técnicos del proyecto, se decidió utilizar esta licencia como licencia del proyecto.

6.3 Selección de componentes

Definir en primera instancia la licencia global deseada para el producto final permite realizar una selección ordenada de los componentes que constituirán el software. En GUIMUS se ha realizado de esta forma y, a la hora de seleccionar componentes se tuvo en cuenta que los mismos fueran compatibles con la licencia global seleccionada (*Apache v2*) así como con las licencias del resto de componentes añadidos al desarrollo. Todos los componentes redistribuibles de la aplicación de GUIMUS

son *opensource* y están liberados o bien bajo licencia BSD-2 o bien bajo licencia *Apache* v2, ambas compatibles entre ellas y todas compatibles con la licencia Apache v2 global del proyecto.

Capítulo 7

Conclusión

El sistema de posicionamiento por identificación de celda descrito en este informe puede implementarse de forma sencilla y con reducido coste en cualquier edificio. Además, es ampliable a demanda, puesto que el número de localizaciones con etiqueta crece exponencialmente simplemente alargando la longitud del mensaje FSK. Es importante remarcar que, aunque la implementación se ha llevado a cabo bajo la plataforma *Android*, es posible su extensión a otras como *iOS* o *Windows Phone*, siempre que el terminal disponga de una frecuencia de captura suficientemente alta.

Sin embargo, existen aspectos importantes en el diseño que deben comentarse, con el fin de aclarar las limitaciones del sistema y definir líneas futuras de trabajo. Una de las más importantes es la sonoridad de balizas que emiten los mensajes, que es imperceptible para la mayoría de los adultos, pero los niños o adolescentes quizás puedan oírlas. La potencia transmitida por uno de estos *tags* es pequeña, incrementando el nivel de presión sonora de una sala desde 40 dB (nivel de ruido típico en un habitación) a 52 dB a 1 m de separación. A pesar de ello, este efecto podría ser molesto con una alta densidad de *tags* en algunas zonas de las salas. Cabe destacar que el trabajo en esta zona audible viene impuesto por la respuesta en frecuencias del micrófono del dispositivo portátil, que cae rápidamente a partir

de los 20 kHz en la mayoría de los dispositivos comerciales. No obstante, algunos fabricantes están empezando a desarrollar aplicaciones incorporando micrófonos ultrasónicos a sus dispositivos. Mientras tanto, podría aplicarse un procesamiento de señal más profundo para reducir la sonoridad, a expensas de empeorar las tasas de acierto en la detección o el tiempo de computación de la aplicación.

Un segundo aspecto que merece atención es el consumo de energía de las balizas. En este trabajo, se han diseñado para emitir un mensaje nuevo cada 80 ms, lo que proporciona una detección rápida del mensaje a través del *smartphone*. Esto no supone un problema siempre que los *tags* estén conectados a la red eléctrica, pero podría serlo si se usan baterías. La solución pasaría por el diseño de balizas reactivas, que proporcionarían una emisión únicamente cada vez que el usuario la demande. Esta solución también mitigaría el problema de sonoridad comentado en el párrafo anterior.

Además, aunque el sistema está diseñado para usarlo en interiores, sería interesante analizar su comportamiento de puertas para fuera, donde podría encontrar aplicación directa en parques, plazas, aparcamientos,... Estos ambientes suponen un reto por sus condiciones cambiantes (temperatura, humedad, o presencia del gradientes de viento o vórtices turbulentos). Haría falta un estudio exhaustivo previo, antes de exportar el sistema al exterior.

El sistema de posicionamiento presentado, está basado en la detección de celda a través de señales acústicas de alta frecuencia, a través de un conjunto de balizas independientes que emiten un código modulado en BFSK que las identifica de forma no ambigua. Una vez detectado, se envía el código desde el dispositivo portátil a un servidor local basado en una plataforma *Raspberry Pi 3B*, que provee información contextual. Los códigos binarios se detectan a través de una demodulación no-coherente, sincronizada gracias a la detección por filtro acoplado de un *chirp*. El esquema de demodulación confiere al sistema resistencia a los desplazamientos Doppler, causados por el movimiento del receptor.

Se ha programado también un simulador en tres etapas, para caracterizar el

sistema en términos de la robustez frente al ruido, cobertura y resistencia Doppler. Cada una de ellas tiene en cuenta implícitamente la respuesta en frecuencias del par emisor-receptor, la atenuación del sonido en el aire, y la mencionada demodulación no-coherente del mensaje en BFSK.

El demodulador se ha implementado en una plataforma basada en *Android*, que realiza las operaciones de filtrado en el dominio de la frecuencia. Los *tags* acústicos son transductores *Kingstate KSSG1708* de alta frecuencia, con un amplificador de clase-D un microcontrolador de bajo coste *STM32L476VG*. Las pruebas se han llevado a cabo sobre un escenario real, para analizar su cobertura y su resistencia al Doppler. Los resultados muestran similitud a la caracterización previa, aunque se han observado ciertas diferencias, probablemente debidas al multicamino, y que no empeoran respecto de los resultados simulados.

Como colofón, se ha decidido dar soporte legal a la aplicación, y someterla a licencia global *Apache v2*, ya que todos los componentes redistribuibles son *open-source* y están liberados.

Finalmente, se han expuesto las limitaciones del sistema, discutiendo claramente las posibles líneas de trabajo futuro.

Bibliografía

- [1] M. Addlesee y col. "Implementing a Sentient Computing System". En: *IEEE Computer* 34.8 (2001), págs. 50-56.
- [2] F. J. Álvarez, T. Aguilera y R. López-Valcarceb. "CDMA-based acoustic local positioning system for portable devices with multipath cancellation". En: *Digital Signal Processing* 62 (2016), págs. 38-51.
- [3] Fernando J. Álvarez y col. "Doppler-tolerant receiver for an ultrasonic LPS based on Kasami sequences". En: *Sensors and Actuators A: Physical* (2013), págs. 238-253.
- [4] Fernando J. Álvarez y col. "GUIMUS: A smartguide based on an Acoustic FSK protocol". En: *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2016)*. 2016.
- [5] *Android Studio SDK*. <https://developer.android.com/studio/index.html>. 2016.
- [6] A. Bonaccorsi, S. Giannangeli y C. Rossi. "Entry Strategies Under Competing Standards: Hybrid Business Models in the Open Source Software Industry". En: *Management Science* 52.7 (2006), págs. 1085-1098.
- [7] K. Cho y col. "Analysis of Latency Performance of Bluetooth Low Energy (BLE) Networks". En: *Sensors* 15 (2015), págs. 59-78.
- [8] A. Engelfriet. "Choosing an open source license". En: *IEEE Software* 27.1 (2010), págs. 48-49.
- [9] V. Filonenko y J. D. Cullen C. and Carswell. "Indoor Positioning for Smartphones Using Asynchronous Ultrasound Trilateration". En: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2.3 (2013), págs. 598-620.
- [10] Y. Fukuju y col. "DOLPHIN: an autonomous indoor positioning system in ubiquitous computing environment". En: *IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems*. 2003, págs. 53-56.
- [11] R. Goldman y R. Gabriel. *Innovation Happens Elsewhere*. 1st Edition. ISBN: 9781558608894. Elsevier, 2005.

- [12] J. R. González y C. J. Bleakley. "High-Precision Robust Broadband Ultrasonic Location and Orientation Estimation". En: *IEEE Journal of selected topics in Signal Processing* 3.5 (2009).
- [13] M. Hazas y A. Hopper. "Broadband Ultrasonic Location Systems for Improved Indoor Positioning". En: *Mobile Computing, IEEE Transactions on* 5.5 (2006), págs. 536-547. ISSN: 1536-1233.
- [14] ISO/TC 43 Technical Committee, Acoustics, Sub-Committee SC1, Noise. *Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. Inf. téc. ISO 9613-1:1993(E). International Organization for Standardization, 1993.
- [15] *JTransforms Libraries*. <https://sites.google.com/site/piotrwendykier/software/jtransforms>. 2016.
- [16] M. Karels. "Commercializing Open Source Software". En: *ACM Queue magazine* 1.5 (2003).
- [17] *Kingstate Electronics Corp*. <http://www.kingstate.com.tw/index.php/en/component/k2/item/66>. 2016.
- [18] M. Köhne y J. Sieck. "Location-Based Services with iBeacon Technology". En: *2014 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*. 2014, págs. 315-321. DOI: 10.1109/AIMS.2014.58.
- [19] J. Lerner y J. Tirole. "The Scope of Open Source Licensing". En: *Oxford Journals, Journal of Law, Economics and Organization* 21.1 (2005), págs. 20-56.
- [20] N. Levanon y E. Mozeson. *Radar Signals*. John Wiley & Sons, 2004.
- [21] *LG X Screen, LGK500N*. <http://www.lg.com/uk/mobile-phones/lg-K500N>. 2016.
- [22] Y. Lin y col. "Open Source Licenses and the Creative Commons Framework: License Selection and Comparison". En: *Journal of Information Science and Engineering* 22 (2006), págs. 1-17.
- [23] Lindman, A. Paajanen y M. Rossi. "Choosing an open source software license in commercial context: a managerial perspective". En: *Proceedings of the 2010 36th EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications*. Lille (France). 2010.
- [24] Cristina V. Lopes y col. "Localization of Off-the-shelf Mobile Devices Using Audible Sound: Architectures, Protocols and Performance Assessment". En: *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* 10.2 (abr. de 2006), págs. 38-50. ISSN: 1559-1662.
- [25] L. Mainetti, L. Patrono e I. Sergi. "A survey on indoor positioning systems". En: *Proc. of the 22nd International Conference in Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. 2014, págs. 111-120.

- [26] A. Mandal y col. "Beep: 3D Indoor Positioning using Audible Sound". En: *Consumer Communications and Networking Conference, 2005. CCNC. 2005 Second IEEE*. 2005, págs. 348-353.
- [27] Rainer Mautz. *Indoor Positioning Technologies*. Institute of Geodesy, Photogrammetry, Department of Civil, Environmental y Geomatic Engineering, ETH Zurich, 2012.
- [28] Chunyi Peng y col. "BeepBeep: A High Accuracy Acoustic Ranging System Using COTS Mobile Devices". En: *Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. SenSys '07. Sydney, Australia: ACM, 2007, págs. 1-14. ISBN: 978-1-59593-763-6.
- [29] José Carlos Prieto y col. "Performance Evaluation of 3D-LOCUS Advanced Acoustic LPS". En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 58.8 (2009), págs. 2385-2395.
- [30] N. Priyantha y col. "Mobile assisted localization in wireless sensor networks". En: *Proc. of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*. 2005, 172?183.
- [31] Jian Qiu y col. "On the Feasibility of Real-Time Phone-to-Phone 3D Localization". En: *Proceedings of ACM SenSys 2011*. ACM SenSys, 2011.
- [32] Jun-Wei Qiu y col. "A D2D Relative Positioning System on Smart Devices". En: *IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*. 2014.
- [33] C. Randell y H. Muller. "Low Cost Indoor Positioning System". En: *Proc. of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing*. Atlanta, USA, 2001, págs. 42-48.
- [34] *Raspberry Pi 3 Model B*. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. 2016.
- [35] C. Ruffin y C. Ebert. "Using open source software in product development: a primer". En: *IEEE Software* 21.1 (2004), págs. 82-86.
- [36] M. M. Saad y col. "High-Accuracy Reference-Free Ultrasonic Location Estimation". En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 61.6 (2012), págs. 1561-1570.
- [37] Fernando Seco y col. "Compensation of Multiple Access Interference Effects in CDMA-Based Acoustic Positioning Systems". En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 63.10 (2014), págs. 2368-2378.
- [38] R. Sen, C. Subramaniam y M. L. Nelson. "Determinants of the Choice of Open Source Software License". En: *Journal of Management Information Systems* 25.3 (2008), págs. 207-240.

- [39] *STM32L4 Series of ultra-low-power MCUs*. <http://www.st.com/en/micro-controllers/stm32l4-series.html?querycriteria=productId=SS1580>. 2016.
- [40] E. Trevisani y A. Vitaletti. "Cell-ID location technique, limits and benefits: an experimental study". En: *Proc. of Sixth IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA 2004)*. 2004.
- [41] S. Widodo y col. "Moving Object Localization Using Sound-based Positioning System with Doppler Shift Compensation". En: *Robotics* (2013), págs. 36-53.
- [42] Bin Xu y col. "Whistle: Synchronization-Free TDOA for Localization". En: *Distributed Computing Systems (ICDCS), 2011 31st International Conference on*. 2011, págs. 760-769.
- [43] Rui Zhang, Fabian Höflinger y Leonhard M. Reindl. "TDOA-Based Localization Using Interacting Multiple Model Estimator and Ultrasonic Transmitter/Receiver". En: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 62.8 (2013), págs. 2205-2214.